

TECNOLOGIAS PARA CONTROLE DE EMISSÕES DE SO₂ EM PROCESSOS SIDERÚRGICOS¹

Ivan R. Jankov²
Renato Barros Greco³
Diego Castellani Tarabini⁴

Resumo

As crescentes restrições quanto à emissão de poluentes atmosféricos impõem a utilização de novos sistemas de controle ambiental. Na indústria siderúrgica no Brasil, os limites de emissão para poluentes atmosféricos são definidos pela resolução CONAMA 382/2006, e, para SO₂, se aplicam às áreas de: coqueria, sinterização, pelotização, laminação e central termelétrica. Os sistemas de dessulfurização de gases (Flue Gas Desulfurization- FGD) baseiam-se em uso de reagente alcalino (por exemplo, calcário, cal, bicarbonato de sódio) para reagir com SO₂ contido no gás e podem ser divididos em três principais grupos: secos, semi-secos e úmidos. A escolha do processo mais adequado depende, entre outros, da eficiência requerida de remoção de SO₂, características de gases a serem tratados (vazão, temperatura, composição), disponibilidade e preço de reagentes, consumo de utilidades (água, ar, energia elétrica) e destinação final dos subprodutos gerados. De forma geral, uma solução integrada de controle de poluição atmosférica (levando em consideração as emissões de material particulado, SO₂, NO_x, mercúrio e outros poluentes) propicia a melhor relação custo/benefício. As tecnologias de FGD mais adequados a serem instalados na indústria siderúrgica são: sistemas seco e semi-seco com cal.

Palavras-chave: Aço; Meio-ambiente; Dessulfurização.

TECHNOLOGIES FOR SO₂ EMISSION CONTROL IN STEEL PRODUCTION PROCESSES

Abstract

Increasing restriction for the air pollutant emission impose the use of the new systems for environmental control. For the steel production industry in Brazil, the atmospheric pollutant limits are defined by the 382/2006 CONAMA resolution and, for SO₂, apply to the areas of: coking, sintering, pelletizing, casting and thermo-electric plant. The Flue Gas Dissulfurization (FGD) systems are based on the use of alkali reagent (e.g., limestone, lime, sodium bicarbonate) for reaction with SO₂ from the flue gas and can be divided into three major groups: dry, semi-dry and wet. The choice of the most appropriate process depends, among other parameters, on the required efficiency for the SO₂ removal, flue gas characteristics (flow, temperature, composition), reagent availability and price, utility consumption (water, air, electric energy) and final destination for the process sub-products. In general terms, an integrated atmospheric pollutant control (taking into consideration the emissions for particulate matter, SO₂, NO_x, mercury and other pollutants) yields the best cost/benefit solution. The most appropriate FGD technologies for the steel production industry are: dry and semi-dry systems using lime.

Key words: Steel; Environment; FGD.

¹ Contribuição técnica ao 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 22 a 26 de novembro de 2009, Ouro Preto, MG.

² Físico. Depto. Novas Tecnologias. ENFIL S/A Controle Ambiental, São Paulo- SP, Brasil

³ Eng. Químico. Gerente Depto. Novas Tecnologias. ENFIL S/A Controle Ambiental, São Paulo- SP.

⁴ Eng. Mecânico. Depto. Novas Tecnologias. ENFIL S/A Controle Ambiental, São Paulo- SP.

1 INTRODUÇÃO

A produção mundial de aço tem sido uma das bases para revolução industrial e cresceu quase exponencialmente de 1870 até os dias de hoje.⁽¹⁾ Nesse período, vários avanços tecnológicos possibilitaram maior produtividade, bem como melhor qualidade de aço, através de processos com maior rendimento energético.

As crescentes restrições quanto à emissão de poluentes atmosféricos impõem a utilização de novos sistemas de controle ambiental, principalmente em processos nos quais há “queima”, total ou parcial, de combustíveis fósseis. As primeiras estratégias da prevenção de poluição atmosférica enfatizavam o controle de material particulado; somente a partir da década de setenta, começou a ser considerado o controle de gases ácidos, como SO_x e NO_x.

Os órgãos ambientais da União Européia e UEA, entre outros, estabelecem, também, limites de emissão de outros tipos de poluentes, tais como: mercúrio, dioxinas/furanos, bifenilpoliclorados, hexaclorobenzenos, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e monocíclicos.

Na indústria siderúrgica no Brasil, os limites de emissão para poluentes atmosféricos são definidos pela resolução CONAMA 382/2006 [2] e, para SO₂, se aplicam às áreas de: coqueria, sinterização, pelotização, laminação e central termelétrica (Tabela 1).

Tabela 1- Valores de limites de emissão para processos siderúrgicos no Brasil⁽²⁾

Unidade de Produção	Fontes de Emissão Pontual	MP ¹⁾	SO ₂ ¹⁾	NO _x (como NO ₂ ¹⁾	%O ₂
Coqueria	Câmara de combustão dos fornos de coque	50	800	700	7
Sinterização	Sistema primário de despoeiramento	70	600	700	N.A. ²⁾
Pelotização	Sistema de exaustão do forno de pelotização	70	700	700	N.A. ²⁾
Laminação	Fornos de reaquecimento de placas com queima de gases siderúrgicos	50	800	700	7
Central termelétrica	Caldeira com queima de gases siderúrgicos	50	600	350	5

¹⁾ os resultados expressos na unidade de concentração mg/Nm³, em base seca e no teor de O₂ explicitado; ²⁾ N.A.- Não Aplicável.

2 METODOLOGIA

Nesse item, serão apresentados os processos siderúrgicos, relevantes na geração de SO₂, e as características gerais dos gases provenientes desses processos. Comparando-se os valores de SO₂ na saída de processo e os limites de emissão, determinados pela resolução CONAMA 382/2006, determina-se a eficiência de remoção necessária.

A seguir, os conceitos básicos das tecnologias de dessulfurização são relatados, com suas principais vantagens e desvantagens, bem como os limites de cada uma em relação à eficiência de remoção de SO₂. Os sistemas de dessulfurização, contemplados nesse artigo, são apropriados somente para remoção de SO_x e não outros compostos de enxofre (por exemplo, H₂S)

2.1 Características de Processos Siderúrgicos

2.1.1 Coqueria

Para produzir coque, uma mistura de carvão, normalmente reduzido a 70-85% menor de 3 mm, passa pelo processo de pirólise, no qual são gerados gases contendo hidrogênio, monóxido de carbono, metano, compostos de enxofre, etc.

No processo de coqueificação sem recuperação de calor, gera-se aproximadamente 400-440 Nm³ de gás combustível/t coque produzida.⁽³⁾ Neste, a maior parte do enxofre presente no carvão é liberado na forma de H₂S (que pode ser recuperado posteriormente, junto com BTX) e somente uma pequena parte como SO_x.

No processo com recuperação de calor, por outro lado, os compostos de enxofre são oxidados durante combustão dentro do forno; portanto praticamente não há mais H₂S presente nos gases, somente SO_x. Neste são gerados cerca de 3.500 Nm³- 4.500 Nm³ produtos de combustão/t coque produzida.

As quantidades típicas de poluentes (em base seca e no teor de O₂ explicitado) gerados na coqueria são mostradas na Tabela 2. Salienta-se que a composição e quantidade de gases gerados dependem do tempo de coqueificação e da composição da mistura de carvão.

Tabela 2- Valores típicos de poluentes gerados no processo de coqueria⁽³⁾

Tipo de processo	MP [mg/Nm ³]	SO _x [mg/Nm ³]	NO _x [mg/Nm ³]	O ₂ [%]
Coqueria sem recuperação de calor	15-75	25-900	200-570	0-0,5
Coqueria com recuperação de calor	435-560	1550-2000	85-110	6-8

2.1.2 Sinterização

O processo de sinterização gera de 1.500 Nm³ a 2.500 Nm³ de gases /t de sinter produzida (valor típico: 2100 Nm³/t de sinter).⁽²⁾ Assim como em outros processos de combustão, há geração de gases ácidos, como SO_x e NO_x (Tabela 3); valores em base seca e no teor de O₂ explicitado).

Tabela 3 - Valores típicos de poluentes gerados no processo de sinterização⁽³⁾

Tipo de processo	MP ¹⁾ [mg/Nm ³]	SO _x [mg/Nm ³]	NO _x [mg/Nm ³]	O ₂ [%]
Sinterização	205-455	330-1130	160-435	11-17

¹⁾ valores já contemplando uma bateria de ciclone instalada

O SO_x presente nos gases de combustão origina-se, principalmente, da oxidação dos compostos de enxofre presentes no coque; o minério contribui muito pouco para a geração de SO_x (menos de 10%). Além disso, a basicidade de mistura de sinter e a distribuição granulométrica de coque influenciam a quantidade de enxofre transformado em SO₂.^(4,5)

Observou-se que o SO_x não é gerado de forma uniforme ao longo da grelha de sinterização [6]; portanto, dependendo do lay-out dos equipamentos e dos limites de emissão impostos, pode-se segmentar a captação de gases e seu tratamento, de maneira a reduzir custos de implantação e consumo de reagentes.

2.1.3 Pelotização

O gás gerado no processo de pelotização varia entre 1.940 Nm³ e 2400 Nm³ de gases/t de pelotas produzida.⁽³⁾ As quantidades (em base seca e no teor de O₂ explicitado) típicas de poluentes gerados durante o processo de pelotização são mostradas na Tabela 4. A concentração de SO_x nos gases depende das quantidades de enxofre no minério de ferro, aditivos e combustível utilizado.

Tabela 4- Valores típicos de poluentes gerados no processo de pelotização⁽³⁾

Tipo de processo	MP [mg/Nm ³]	SO _x [mg/Nm ³]	NO _x [mg/Nm ³]	O ₂ [%]
Pelotização	10-70	8-130	50-265	16-19

2.1.4 Laminação e central termelétrica

Como as emissões da central termelétrica e de processo de laminação dependem tanto da mistura de combustível utilizado (carvão, óleo, gás natural ou proveniente do processo siderúrgico), quanto da tecnologia de combustão, as composições típicas desses gases variam significativamente, dependendo da estratégia de gestão de energia da planta siderúrgica. A concentração de SO₂ nos gases gerados nesses processos pode aumentar significativamente caso o gás proveniente de coqueificação seja utilizado sem prévia remoção de H₂S.

2.2 Tecnologias de Desulfurização de Gases

Os sistemas de dessulfurização de gases (*Flue Gas Desulfurization- FGD*) baseiam-se em uso de reagente alcalino (por exemplo, calcário, cal, soda cáustica, bicarbonato de sódio) para reagir com o SO_x contido no gás e podem ser divididos em três principais grupos: secos, semi-secos e úmidos.

A seguir, breves resumos das características das tecnologias mais utilizadas serão apresentados.

2.2.1 Injeção no duto - compostos de sódio e cálcio (sistema seco)

Esses sistemas utilizam vários compostos como reagente: carbonato/bicarbonato/sesquicarbonato de sódio e cal hidratada. Salienta-se que a cal hidratada pode ser adquirida diretamente de fornecedores ou produzida na própria planta, a partir da “extinção” (*slaking*) da cal virgem (transformando-a em hidróxido de cálcio). Para aumentar a superfície reativa do material, atingindo assim altas eficiências de remoção, necessita-se de distribuição granulométrica de 15 µm -20 µm, que é normalmente produzida com um sistema de moagem (de múltiplos estágios, caso a distribuição granulométrica da matéria prima de entrada for acima de 150 µm).

O reagente é injetado seco, pneumaticamente, no duto a montante do equipamento de controle de material particulado (filtro de mangas ou precipitador eletrostático), onde SO_x presente nos gases é absorvido durante o contato gás-reagente (Figura 1). Para aumentar a eficiência de remoção, água pode ser injetada separadamente para condicionar o gás (diminuindo a temperatura e aumentando a umidade).

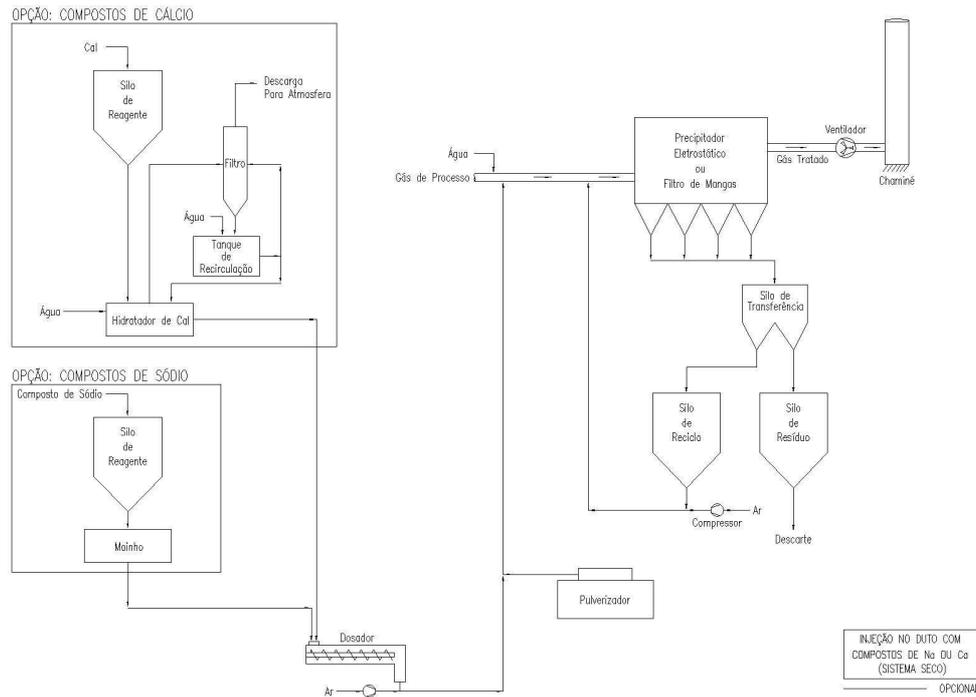


Figura 1- Fluxograma típico de Injeção no duto - Compostos de Sódio e Cálcio (Sistema Seco)

A reatividade de compostos com sódio depende do fenômeno de decomposição termal de bicarbonato em carbonato de sódio (com alta porosidade), que abaixo de 140°C não é suficiente rápida. Portanto, para as temperaturas de gás de processo abaixo de 140°C , somente cal hidratada pode ser utilizada, notando que sua reação com SO_2 é mais eficiente para as temperaturas menores.

O filtro de mangas propicia a ocorrência da chamada “absorção secundária”, isto é, o reagente presente no *cake* formado sobre o elemento filtrante continua a absorver o SO_x presente nos gases que atravessam a manga. Dependendo da eficiência de remoção requerida, o projeto do filtro de mangas (relação ar-pano, características da manga, ciclo de limpeza etc.) pode ser um fator decisivo no alcance da performance desejada. No caso do precipitador eletrostático, o mesmo não ocorre, pois o material coletado na placa tem “pouco contato” com os gases. Tipicamente, portanto, a tecnologia de absorção seca apresenta maior eficiência de remoção em sistemas que operam com filtro de mangas.

O material removido (para caso de compostos de sódio- mistura de carbonato de sódio, sulfeto/sulfato de sódio e cinzas; para caso de compostos de cálcio- mistura de cal hidratada, sulfeto/sulfato de cálcio e cinzas) é transportado para silo de armazenamento e depois encaminhado para sua destinação final. No caso de cálcio, para aumentar a eficiência da remoção de SO_2 , bem como diminuir o uso de cal hidratada, uma porção de material coletado pode ser recirculada. Para caso de sódio, em geral, não se utiliza o sistema de recirculação.

A eficiência típica de remoção de SO_2 é de 25-75%, podendo chegar a 80%,⁽³⁾ e depende de seguintes variáveis, como: tipo de coletor de particulado, umidade e temperatura do gás, reagente (tipo e granulometria), relação Na/S ou Ca/S, concentração de SO_x na entrada, forma de injeção, tempo de residência etc.

Principais vantagens/desvantagens desse sistema são:

Vantagens:

- Remoção integrada de SO₂ e Material Particulado;
- Custo de implantação relativamente baixo;
- Mão de obra para manutenção e operação relativamente baixa;
- Maiores eficiências de remoção para outros gases ácidos, como: SO₃ e HCl;
- Gases de exaustão, não precisam ser reaquecidos.

Desvantagens:

- Produz resíduo sólido com pouco potencial de reuso;
- Alto custo de reagente no caso nos compostos de sódio;
- Limitação da eficiência de remoção de SO_x;
- Para caso de sódio, material coletado no equipamento com alta solubilidade o que pode limitar as opções de destinação final.

2.2.2 Leito fluidizado circulante com cal (sistema seco)

A cal hidratada (que normalmente é produzida na planta, mas pode ser adquirida diretamente de fornecedores) é injetada seca, pneumaticamente, no Absorvedor a montante do equipamento de controle de material particulado (filtro de mangas ou precipitador eletrostático), onde SO_x presente nos gases é absorvido durante o contato gás-reagente (Figura 2). Para atingir o grau de umidificação necessário para a reação de absorção do SO_x, há injeção separada de água. O Absorvedor é projetado de maneira a funcionar como um leito fluidizado circulante, no qual o reagente e a água são injetados em sentido co-corrente aos dos gases.

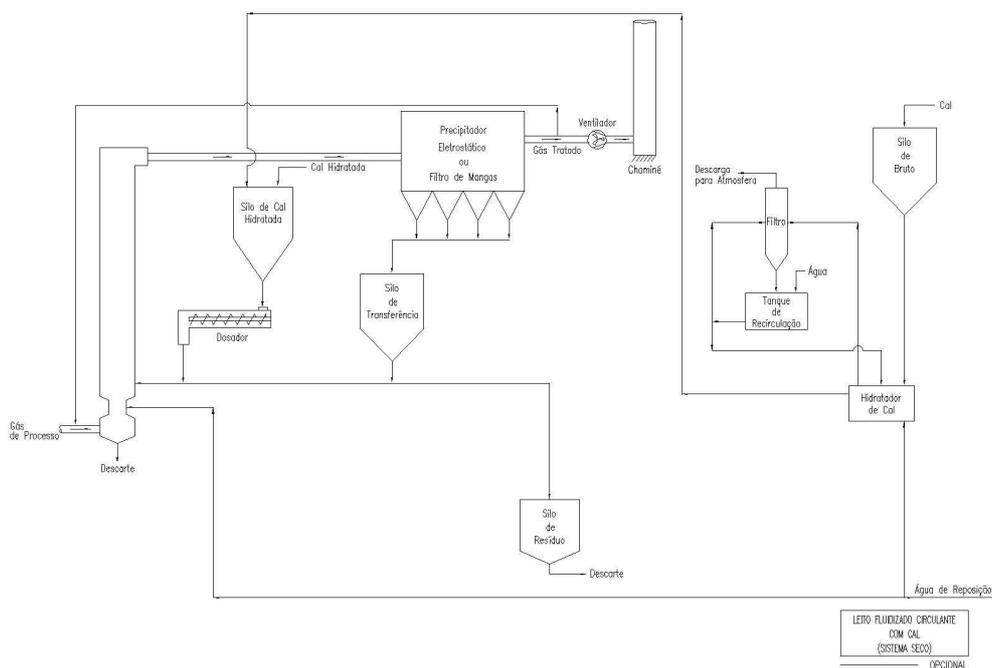


Figura 2- Fluxograma típico de Leito Fluidizado Circulante com Cal (Sistema Seco).

O controle de temperatura de gás de saída de absorvedor é um dos parâmetros mais críticos na operação do sistema, já que a temperatura precisa ser suficientemente “baixa” para melhorar a reatividade de reagente com gases ácidos, mas suficientemente “alta” para garantir o processo seco (ou seja, temperatura acima de ponto de orvalho) em todos os pontos do sistema, impedindo possível

condensação e corrosão, bem como entupimento de equipamento de controle de particulado com o material “úmido”.

Para garantir altas eficiências de remoção, o sistema conta com alta taxa de recirculação de pó (coletado no filtro de mangas ou precipitador eletrostático). O restante do material coletado (mistura de cal hidratada, sulfeto/sulfato de cálcio e cinzas) é transportado para silo de armazenamento e depois encaminhado para sua destinação final.

A eficiência típica de remoção de SO_2 é de 85%-95%, atingindo 97%,⁽³⁾ e depende de seguintes variáveis, como: tipo de coletor de particulado (de acordo com o fenômeno de “absorção secundária”, descrita no item 3.1), temperatura de gás tratado (proximidade do ponto de orvalho), relação Ca/S, concentração de SO_x na entrada, tempo de residência etc.

Principais vantagens/desvantagens desse sistema são:

Vantagens:

- Remoção integrada de SO_2 e Material Particulado;
- Mão de obra para manutenção e operação relativamente baixa;
- Poucos problemas de entupimento;
- Sem preocupações com o manuseio de soluções líquidas;
- Maiores eficiências de remoção para outros gases ácidos, como: SO_3 , HCl e HF;
- Médio custo de reagente;
- Gases de exaustão não precisam ser reaquecidos.

Desvantagens:

- Produz resíduo sólido, com pouco ou nenhum potencial de reuso;
- Produz resíduo sólido de difícil manuseio em instalações com uso de injeção de amônia para controle de NO_x .

2.2.3 Reator tipo *spray dryer absorber (sda)* com cal (sistema semi-seco)

Diferentemente dos sistemas secos, descritos acima, o reagente (cal hidratada) é injetado sob a forma de suspensão em água (“leite de cal”), gerando, no entanto, o resíduo seco.

O “leite de cal” é produzido na própria planta, a partir da extinção de cal virgem em água, formando uma suspensão com cerca de 20%-25% de sólidos. Dependendo das condições de processo, a suspensão pode passar por mais etapas de diluição antes de ser injetada no Absorvedor através de bicos injetores (utilizando-se ar comprimido para dispersar a suspensão de reagente) ou pelo atomizador rotatório (acelerando a suspensão dentro do disco giratório e forçando-a através das aberturas (feitos de materiais resistentes como carbeto de tungstênio ou silício) localizadas ao redor da circunferência do disco em rotação) (Figura 3); salienta-se que o sistema com atomizador rotatório é mais comum.

No Absorvedor, a água presente no “leite de cal”, em contato com os gases a serem tratados, é evaporada, resfriando-os. Ao mesmo tempo ocorre a absorção do SO_x pelas gotículas e sua reação com a cal hidratada em suspensão. Posteriormente, os gases, carregados com material particulado (sulfeto/sulfato de cálcio e cinzas do processo), passam por filtro de mangas ou precipitador eletrostático antes de sua descarga para a atmosfera.

O material coletado é transportado para silo de armazenamento e depois encaminhado para sua destinação final. Dependendo da eficiência de remoção requerida e das características do gás a ser tratado, parte do material coletado no

filtro de mangas ou precipitador eletrostático é recirculada de volta ao processo e misturada ao “leite de cal”.

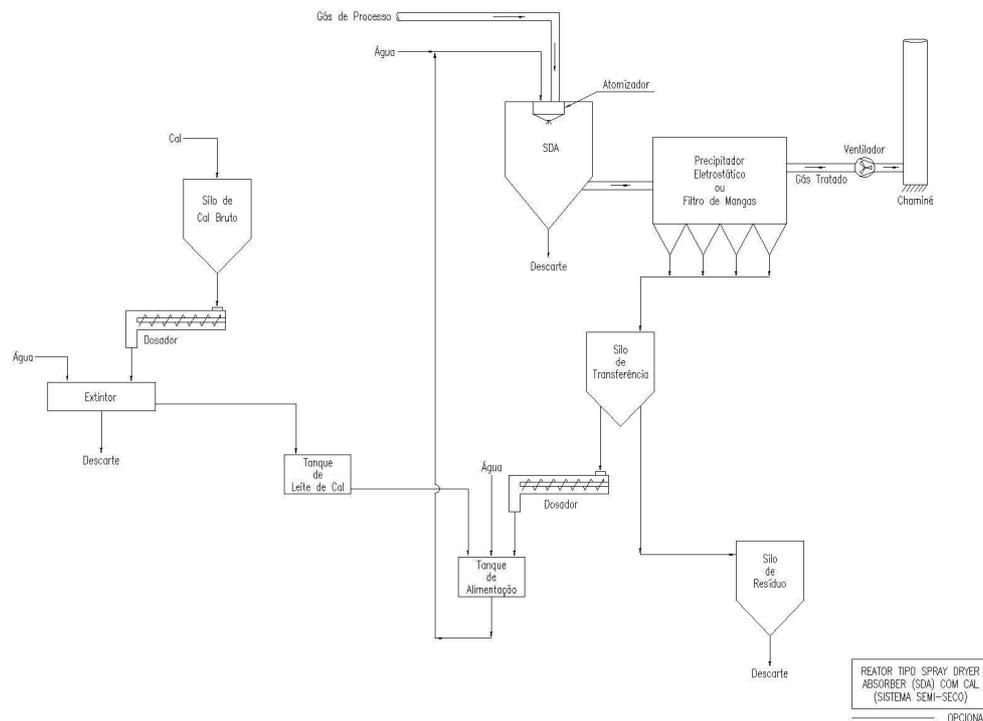


Figura 3- Fluxograma típico de Reator tipo *Spray Dryer Absorber (SDA)* com Cal (sistema semi-seco).

A eficiência típica de remoção de SO₂ é de 80%-93%, atingindo 95% [3], e depende de seguintes variáveis, como: tipo de coletor de particulado (de acordo com o fenômeno de “absorção secundária”, descrita no item 3.1), temperatura de gás tratado (proximidade do ponto de orvalho, ver item 3.2), relação Ca/S, concentração de SO_x na entrada, tempo de residência etc.

Principais vantagens/desvantagens desse sistema são:

Vantagens:

- Remoção integrada de SO₂ e Material Particulado;
- Mão de obra para manutenção e operação relativamente baixa;
- Geralmente altas taxas de remoção de SO₃;
- Médio custo de reagente;
- Gases de exaustão não precisam ser reaquecidos.

Desvantagens:

- Produz resíduo sólido com pouco ou nenhum potencial de reuso;
- Produz resíduo sólido de difícil manuseio em instalações com uso de injeção de amônia para controle de NO_x.

2.2.4 Absorvedor com calcário e oxidação forçada (sistema úmido)

De maneira similar ao processo semi-seco, o reagente (calcário) é injetado no absorvedor sob a forma de suspensão em água, porém, o resíduo gerado é úmido, isto é, “lama”.

Após moagem (normalmente no moinho úmido com classificador e sistema de recirculação de grosso), processada na própria planta, o calcário é misturado com água, formando uma suspensão, que é introduzida na parte inferior do absorvedor

(Figura 4). As bombas de recirculação captam a lama da parte inferior e a injetam, através de bicos atomizadores em diferentes níveis, na parte superior do Absorvedor, de maneira a criar fluxo contra-corrente em relação aos gases. Por tratar-se de um sistema de “lavagem úmida”, os gases são saturados no absorvedor e precisam ser reaquecidos para não apresentar pluma visível na chaminé.

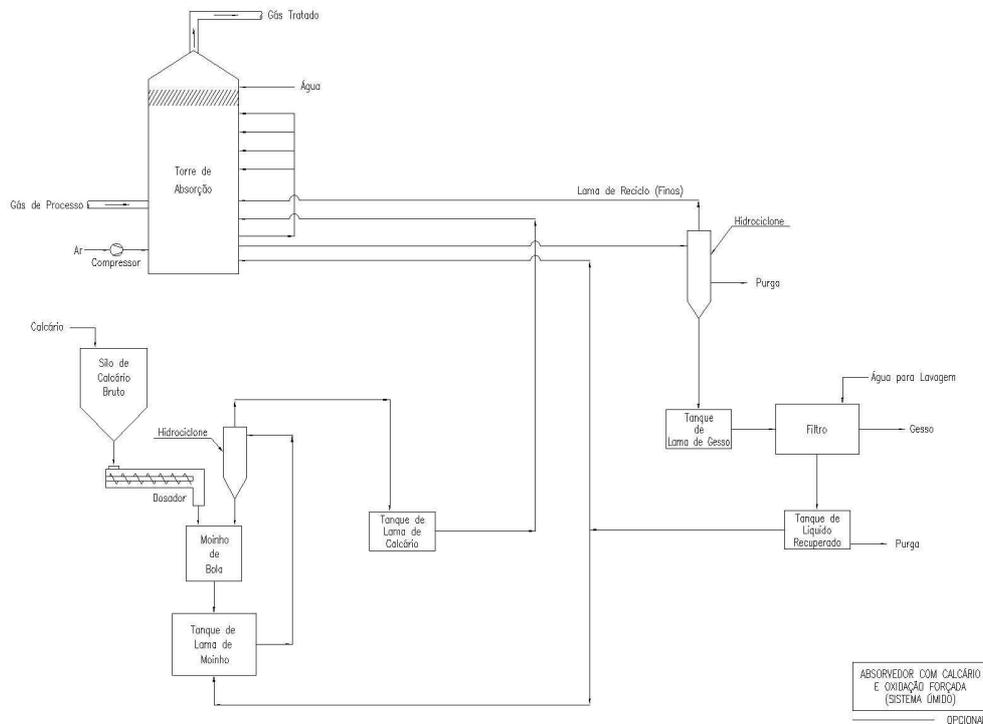


Figura 4- Fluxograma típico de absorvedor com calcário e oxidação forçada (sistema úmido).

Como a maior parte do SO_x é absorvido formando sulfeto de cálcio, é necessário promover sua oxidação a sulfato, para formação de gesso (que possui valor comercial). Para garantir a conversão de sulfeto a sulfato, injeta-se ar na parte inferior do Absorvedor. O gesso é constantemente removido do processo através de bateria de hidrociclones e posteriormente desaguado para obtenção do produto "seco". A maior parte do líquido é recirculado para o processo, porém uma pequena parcela é retirada a fim de evitar o acúmulo de impurezas no tanque de Absorvedor, bem como no gesso.

A eficiência típica de remoção de SO_2 é de 80%-98%,⁽³⁾ e depende de seguintes variáveis, como: reagente (tipo e granulometria), relação Ca/S, concentração de SO_x na entrada, forma de injeção, tempo de residência, etc.

Principais vantagens/desvantagens desse sistema são:

Vantagens:

- Baixo custo do reagente (calcário);
- Pode produzir gesso para comercialização;
- Os avanços tecnológicos minimizaram os problemas de entupimento;
- Capacidade de remoção de SO_2 e Material Particulado.

Desvantagens:

- Alto investimento inicial
- Requer sistema de tratamento de efluentes líquidos
- Em geral requer reaquecimento dos gases após o absorvedor para minimizar problemas de corrosão e dispersão de gases na chaminé.

4 DISCUSSÃO

A escolha do processo mais adequado depende, entre outros, de eficiência requerida de remoção de SO₂, características de gases a serem tratados (vazão, temperatura, composição), disponibilidade e preço de reagentes, consumo de utilidades (água, ar, energia elétrica) e destinação final dos subprodutos gerados.

Para as áreas em questão (coqueria, sinterização e pelletização), admitindo a resolução CONAMA 382/2006 como referência, não é necessária tecnologia com alta eficiência de remoção de SO_x (Tabelas 5,6 e 7).

Tabela 5- Eficiência de remoção requerida para Coqueria

Tipo de processo	SO _x ¹⁾ (máx.)	O ₂ [%]	SO _x ¹⁾ (máx.) (corrigido para 7% O ₂)	Limite SO _x (@ 7% O ₂)	Eficiência máxima de remoção requerida (%)
Coqueria com recuperação de calor	2000	6 - 8	1857 - 2154	800	57 - 63
Coqueria sem recuperação de calor	900	< 0,5	600 - 615	800	N.A. ²⁾

¹⁾ os resultados expressos na unidade de concentração mg/Nm³, em base seca e no teor de O₂ explicitado. ²⁾ N.A. - Não Aplicável.

Para o processo de coqueria sem recuperação de calor, não há necessidade de se instalar o sistema de FGD. Para o processo com recuperação, em princípio pode-se desconsiderar a opção de lavagem úmida com calcário (alto custo de implantação), pois a eficiência de remoção requerida é relativamente baixa. Por outro lado, o consumo de reagente nos sistemas de injeção no duto é relativamente alta, especialmente quando a concentração de cloretos nos gases é levada em consideração. As soluções de melhor custo-benefício para o processo de coqueificação com recuperação, portanto, são: Reator tipo *Spray Dryer Absorber* (SDA) com Cal (Sistema Semi-seco) e Leito Fluidizado Circulante com Cal (Sistema Seco).

Tabela 6- Eficiência de remoção requerida para Sinterização

Tipo de processo	SO _x ¹⁾ (máx.)	O ₂ [%]	Limite SO _x (@ 11% O ₂ ²⁾)	Eficiência máxima de remoção requerida (%)
Sinterização	1130	11	600	47

¹⁾ os resultados expressos na unidade de concentração mg/Nm³, em base seca e no teor de O₂ explicitado. ²⁾ como na resolução CONAMA 382/2006, para processo de sinterização, o valor de O₂ não é informado, nesse artigo, assumiu-se que é igual ao de processo.

Como a eficiência máxima de remoção requerida é de aproximadamente 50% (Tabela 6) a análise de custo-benefício indica, em processo de sinterização, a utilização de tecnologias de Injeção no duto (Sistema Seco). Como as temperaturas de gás estão normalmente abaixo de 150°C, o sistema seco com cal hidratada (com ou sem umidificação, dependendo da efetiva eficiência requerida) se torna mais vantajoso, devido à baixa reatividade dos compostos com sódio nessas temperaturas. Alternativamente, pode-se promover a injeção seca dos compostos de sódio em diferentes "pontos" (com temperaturas da ordem de 200°C) do forno de sinterização.

Tabela 7- Eficiência de remoção requerida para Pelotização

Tipo de processo	SO _x ¹⁾ (máx.)	O ₂ [%]	Limite SO _x (@ 11% O ₂ ²⁾)	Eficiência máxima de remoção requerida (%)
Pelotização	130	15-20	700	N.A. ³⁾

¹⁾ os resultados expressos na unidade de concentração mg/Nm³, em base seca e no teor de O₂ explicitado. ²⁾ como na resolução CONAMA 382/2006, para processo de sinterização, o valor de O₂ não é informado, nesse artigo, assumiu-se que é igual ao de processo. ³⁾ N.A.- Não Aplicável.

Para processo de pelotização, conclui-se que para atingir os valores de limites de emissão, não há necessidade de se instalar um sistema de dessulfurização.

Para as áreas de laminação e central termelétrica, não é possível estabelecer, de forma geral, a eficiência de remoção requerida.

Salienta-se que a quantidade de SO_x a ser removida nos processos siderúrgicos depende principalmente de dados relacionados às características dos combustíveis fósseis (carvão e óleo) utilizados na planta. Portanto, uso de matéria-prima com menor teor de enxofre, bem como melhorias de eficiência energética (que, por sua vez, reduz o consumo específico de combustível), pode ser uma alternativa interessante às soluções de tratamento tipo final da linha (*end-of-pipe*).⁽³⁾

5 CONCLUSÃO

Na Tabela 8, a comparação qualitativa de sistemas secos, semi-secos e úmidos de dessulfurização está apresentada (A- alto, M- médio, B- baixo).

Tabela 8- Comparação de sistemas de FGD

Característica de sistema	Tipo de sistema		
	Seco	Semi-seco	Úmido
Eficiência de remoção típica	25-75%	80-93%	80-98%
Complexidade ¹⁾	B	M	A
Flexibilidade ²⁾	M/B	M	A
Requerimentos de habilidade ³⁾	M/B	M	A
Custo de reagente	M (cálcio) A (sódio)	M	B
Custo de implementação	M/B	M	A

¹⁾ definida como requerimento de unidades adicionais de processo e aspectos críticos de operação; ²⁾ definida como habilidade da técnica operar sobre a gama de condições operacionais de entrada; ³⁾ definido como requerimentos notável de operários e de treinamento extra.

Os sistemas de dessulfurização mais adequados a serem instalados na indústria siderúrgica são: sistemas seco e semi-seco com cal.

Salienta-se que a quantidade de outros poluentes presentes no gás de processo pode influenciar na escolha de sistema FGD:

1. Caso tecnologia escolhida de controle de emissão de mercúrio, dioxinas/furanos esteja injeção de carvão ativado ou coque de lignita, a solução que contempla o uso de filtro de mangas se torna mais vantajosa;
2. Caso o baixo limite de emissão para material particulado esteja limitando a escolha de equipamento para o filtro de mangas, o sistema úmido se torna desvantajoso.

3. Caso alta concentração de fluoretos ($>5\text{mg/Nm}^3$) esteja presentes no gás, o uso de mangas de fibra de vidro não é recomendado.

Portanto, de forma geral, uma solução integrada de controle de poluição atmosférica (levando em consideração as emissões de material particulado, SO_2 , NO_x e mercúrio), propicia a melhor relação custo/benefício.

REFERÊNCIAS

- 1 Wirtschaftsvereinigung Stahl (Hrsg.), Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 1996 (1996) (Statistical Yearbook of the Steel Industry 1996)
- 2 Resolução 382/2006 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) do Brasil
- 3 Integrated Pollution Prevention and Control, Best Available Techniques Reference Document for the Production of Iron and Steel, European Commission, December 2001
- 4 Bothe, R., Umweltproblematik bei der Eisenerzsinterung (Environmental Problems of the Iron Ores Sintering Process), Dissertation, RWTH D-Aachen (1993) *apud* Referência 3 desse artigo
- 5 Beer, H.; Beier, W.; Buckel, M.; Gerstenberg, B.; Kersting, K.; Kropla, H.-W.; Lungen, H.B.; Müller, H.; Rinne, K.; Schierloh, U., Verfahrenstechnische und metallurgische Maßnahmen zur Verminderung des Energieeinsatzes in Sinteranlagen (Process-integrated and Metallurgical Measures to Reduce Energy Consumption of Sinter Plants), Stahl und Eisen 111 (1991), No. 11, 25-37 *apud* Referência 3 desse artigo
- 6 Neuschütz, D.; Spencer, Ph.; Weiss, W.; Janz, J., Comparison on Thermochemically Calculated and Measured Dioxin Contents in the Off-gas of a Sinter Plant - Part 1, Proceedings of the 9th Japan-Germany Seminar on Fundamentals of Iron and Steelmaking on September 8-9 (1996) 113-117 *apud* Referência 3 desse artigo